



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Nyt laboratorieudstyr til simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter

Feld, T.; Leth, C. T.; Mikkelsen, H.; Steenfelt, J. S.

Published in:
Proceedings fra NGM-2000 : XIII Nordiska Geoteknikermötet

Publication date:
2000

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Feld, T., Leth, C. T., Mikkelsen, H., & Steenfelt, J. S. (2000). Nyt laboratorieudstyr til simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter. I R. H. (Ed.) (red.), *Proceedings fra NGM-2000 : XIII Nordiska Geoteknikermötet: Helsinki, Finland, 5-7 June 2000* (s. 77-84). Building Information Ltd..

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Finnish Geotechnical Society

NGM-2000
XIII Nordiska Geoteknikermötet
Helsinki 5.-7. Juni 2000

Hans Rathmayer
editor



Finnish Geotechnical Society r.y.

NGM – 2000
XIII Nordiska Geoteknikermötet
Helsinki 5.–7. Juni 2000

Editor
Hans Rathmayer

Building Information Ltd
Helsinki

XIII Nordiska Geoteknikermötet / Helsinki / Juni 5–7. 2000

Editor Hans Rathmayer, hans.rathmayer@vtt.fi
VTT – Communities and Infrastructure, Espoo, Finland

© Finnish Geotechnical Society r.y.
ISBN 951-682-600-8
Publisher Building Information Ltd, www.rakennustieto.fi
Printed by Tammer-Paino Oy Tampere 2000

Nyt laboratorieudstyr til simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter.

Tove Feld

Rambøll & Aalborg Universitet, Danmark

Caspar Thrane Leth

Geoteknisk Institut, Danmark

Henrik Mikkelsen,

Aalborg Universitet, Danmark

Jørgen S. Steenfelt

IGG, Danmarks Tekniske Universitet, Danmark

ABSTRACT: Fundering af offshore konstruktioner har øget interessen for sugebøttefundamenter i det sidste årti. Det betyder, at sugebøtter nu også finder anvendelse på andet end egentlige offshore konstruktioner. På Aalborg Universitet, AAU, er der designet og fremstillet et nyt laboratorieudstyr til 1g simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter i sand samt til nærmere undersøgelse af de primære mekanismer, der styrer bøttens opførsel. I den nye forsøgsopstilling, hvor en bøtte simuleres under offshore betingelser, monitoreres poretryk på udvalgte lokaliteter i sandet. Udstyret er placeret i en dynamisk opstilling, der giver mulighed for simulering af gentagne dynamiske påvirkninger. Forsøg med en halv bøtte, placeret op mod en gennemsigtig væg, identificerer strømningen under optrækning (brudfigur ved pullout), svarende til den maksimale trækstyrke i fundamentet. I denne artikel beskrives udstyret samt en række indledende forsøg, hvor trækcapaciteten af en sugebøtte i sand og dens opførsel under cyklisk belastning undersøges ved forskellige belastningsfrekvenser. Sugebøttens opførsel karakteriseres ved den påførte kraft, udviklingen i poretrykket, samt den resulterende flytning af bøtten. Afslutningsvis beskrives hvordan de udførte modelforsøg er simuleret i det ikke lineære finite element program ABAQUS

1. INDLEDNING

Fra midt i halvfjerdserne, hvor gravitationsfundamenterne af beton for alvor vandt indpas, er der benyttet skørter på traditionelle offshore fundamenter. Skørterne har vist sig at være økonomisk attraktive og kombinationen giver en pålidelig funderingsmetode. Efter at egentlige bøttefundamenter blev benyttet på Draupner E (tidl. Europipe 16/11E) samt Sleipner, er interessen for sugebøttefundamenter øget. Ved tryk på en bøtte overføres kraften som ved almindelige fundamenter som kontakt tryk mellem bøtte og jord, mens der ved træk opstår et transient undertryk inde i bøtten, som optager trækraften og hindrer en løftning af fundamentet. Indtil for nylig er sugekraften udelukkende blevet anvendt under installations, og afinstallations fasen. På længere sigt bør denne kraft inkluderes ved vurdering af selve driftsfasen, hvorved sugebøttefundering kan blive en attraktiv og anvendelig funderingsmetode. Det betyder, at sugebøtter fremover kan finde anvendelse ved lettere offshore konstruktioner, som havvindmøller, lastebøjer mm. og ikke kun ved større, traditionelle offshore konstruktioner.

Indledende beregninger har vist, at bøttefundamenter er økonomisk attraktive på havvindmøller, som er udsat for en række uafhængige dynamiske påvirkninger fra bølger, vind eller is, jf. Feld et al. (1999). Fordelen ved sugebøttefundering er, at spidsbelastningen fra de dynamiske påvirkninger for en stor dels vedkommende kan optages af det transiente sug den dynamiske påvirkning medfører. Som resultat kan fundamentsdimensionen reduceres.

I forbindelse med et erhvervsforskerprojekt om udvikling af sugebøttekoncept for havbaserede vindmøller blev der på Laboratoriet for Vand, Jord og Miljøteknik ved Aalborg Universitet, AAU, fremstillet en laboratorieopstilling til 1g simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter.

Udstyret blev designet, og indledende forsøg udført af Leth og Mikkelsen (1998). Det nye udstyr skulle kunne håndtere træk- og trykforsøg på såvel halve som hele bølter, samt mere komplicerede gentagne dynamiske påvirkninger, svarende til simulering af aktuelle påvirkninger på sugebølter fra vind, bølger eller is.

2. UDVIKLING AF LABORATORIETEST SET-UP

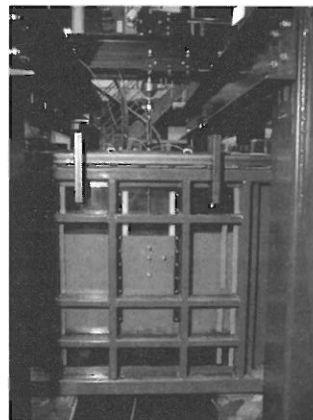
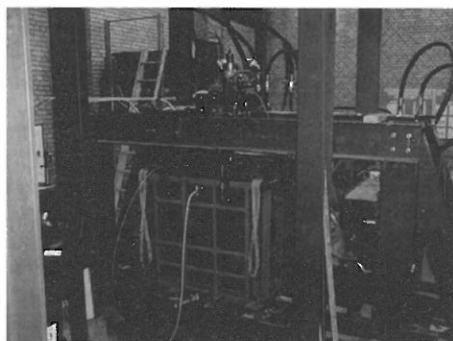
2.1 Krav, ønsker og begrænsninger for opstilling

Udgangspunktet for udviklingen af den nye forsøgsopstilling var, at det skulle være muligt at simulere offshore konstruktioner med både vandtryk og dynamiske belastninger. I det geotekniske laboratorium ved Aalborg Universitet eksisterede der en dynamisk opstilling, som tidligere havde været brugt til forsøg med dynamisk påvirkede fundamenter, Rasmussen (1996). Med udgangspunkt i denne opstilling blev der designet en ny forsøgskasse med tilhørende instrumentering til simulering af dynamisk påvirkede sugebølter.

Den nye forsøgskasse er kubisk med en sidelængde på 1 meter og er beskrevet i detaljer af Leth og Mikkelsen (1998). For at kunne simulere nearshore konstruktioner, blev kassen designet til at kunne modstå et overtryk svarende til 5 m vandsøjle, og der blev udfærdiget en vandtæt gennemføring i låget til belastningsstangen mellem kraftcellen og forsøgsbølten.

For at kunne visualisere mekanismerne i jorden i og omkring bølterne, blev den ene væg i forsøgskassen udført af plexiglas, som vist på figur 1.

De gennemførte forsøg er alle udført med en Ø200 bølge (Diameter på 200 mm og H/D forhold på 1/2) og på Baskarp nr. 15 sand, en friktionsjord der har været anvendt på AAU i flere år og er beskrevet i detaljer af Ibsen og Bødker (1993).



Figur 1 Forsøgsopstilling til sugebøltefundamenter monteret i den cykliske opstilling efter Leth og Mikkelsen (1998).

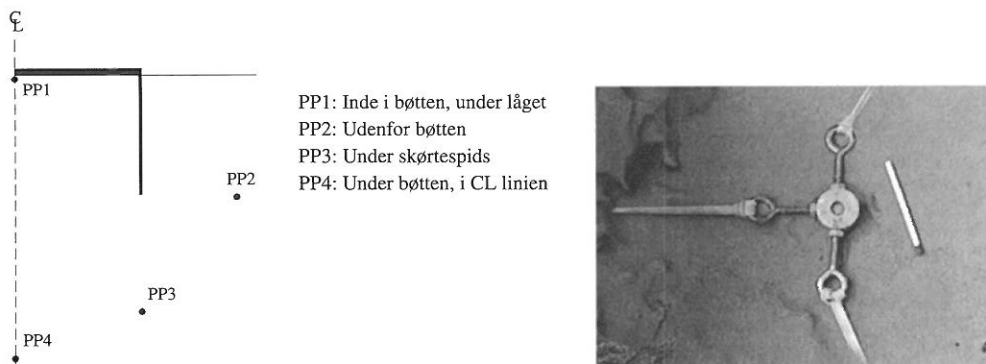
2.2 Moniteringsforhold

Til beskrivelse af bøltens opførsel og mekanismer i jorden blev de udførte forsøg monitoreret i form af kraftmålinger, flytningsmålinger samt måling af poretryksændringer.

Måling af kraften blev foretaget ved brug af en krafttransducer monteret udenfor forsøgskassen mellem kraftcellen og belastningsstangen til bølten. For at kunne følge flytningen af bølten svarende til en given belastning, blev der placeret en flytningstransducer mellem et stationært punkt på forsøgsopstillingen og et fast punkt på belastningsstangen.

Det er interessant at undersøge poretryksudviklingen i forsøgskassen i og omkring bøtten, da denne udvikling kan be- eller afkræfte, om der opstår et reduceret poretryk (sug) under forsøget. Ved at måle poretrykket bliver det mulig at klarlægge nogle af de mekanismer, der opstår under gentagne cykliske påvirkninger.

Poretrykket blev monitoreret på fire lokaliteter, ved hjælp af poretryktransducere, placeret som angivet i figur 2 a). For at fastholde poretrykstransducerne på de ønskede lokaliteter, blev de fastgjort i en stål ring, der ved hjælp af gummibånd blev fikseret til væggen af forsøgskassen, som vist på figur 2 b).

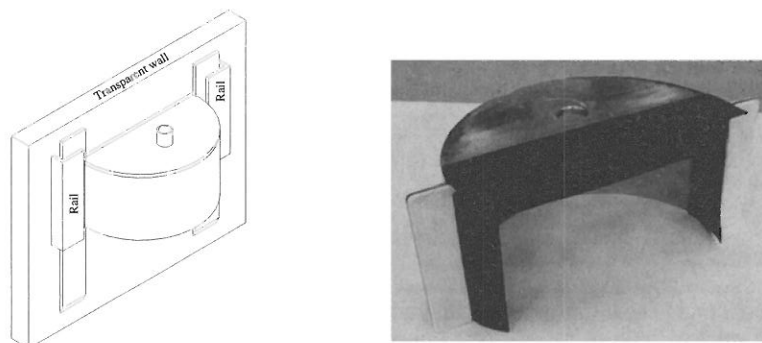


Figur 2 a) Principskitse af poretryktransducernes placering b) Fiksering af poretrykstransducer, efter Leth og Mikkelsen (1998).

2.3 Visualisering af mekanismer

For at kunne visualisere mekanismer i og omkring sugebøtten blev den ene side i forsøgskassen udført af plexiglas. Der blev designet en halv bøtte, således at det var muligt at foretage visuelle observationer, i form af strømmet under bøtten. Denne halve bøtte blev placeret op mod plexiglasvæggen og for at fastholde bøtten til væggen, blev en særlig anordning konstrueret, hvor bøtten kører i et sæt skinner, som vist i figur 3 a).

Efter et par indledende forsøg, blev bøtten tætnet med gummiflaps som vist på figur 3 b), og der blev opnået en tæt samling. Strømnettet blev tydeliggjort ved at injektare rød frugtfarve gennem 3 huller i den transparente væg.



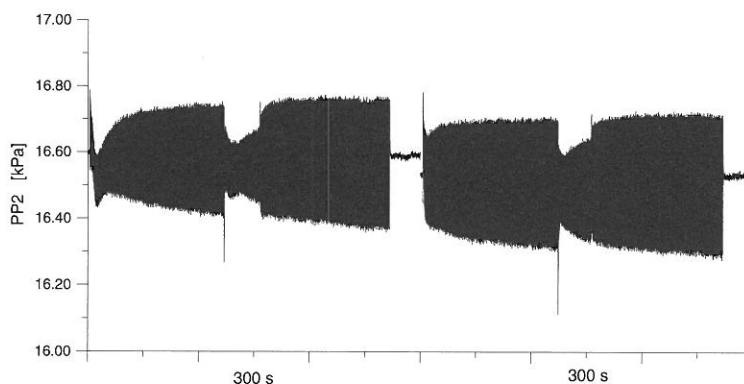
Figur 3 a) Principskitse af anordning til friktionsløs fastholdelse af den halve bøtte b) 1/2 bøtte med gummiflaps, efter Leth og Mikkelsen (1998).

3. FORSØG

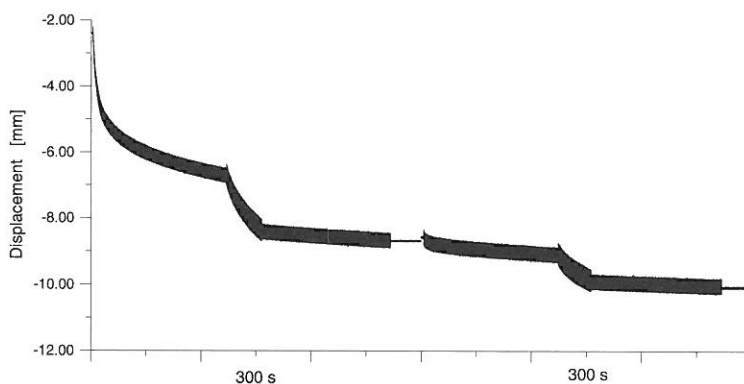
3.1 Cykliske forsøg

En række dynamiske forsøg blev gennemført med belastninger svarende til de gentagende cykliske påvirkninger en offshorekonstruktion er udsat for, belastninger fra hhv. vind-, bølger og is.

De cykliske forsøg er kraftstyrede, og som det fremgår af figur 4, stabiliserer poretrykket sig hurtigt, hvorimod den cykliske degradering får flytningen til at falde støt (figur 5). Poretrykket falder dog en smule som følge af den cykliske degradering.



Figur 4. Poretryksudvikling uden for bøtten (PP2) hidrørende fra to lastsekvenser, forsøgsserie S-270798 efter Leth og Mikkelsen (1998).



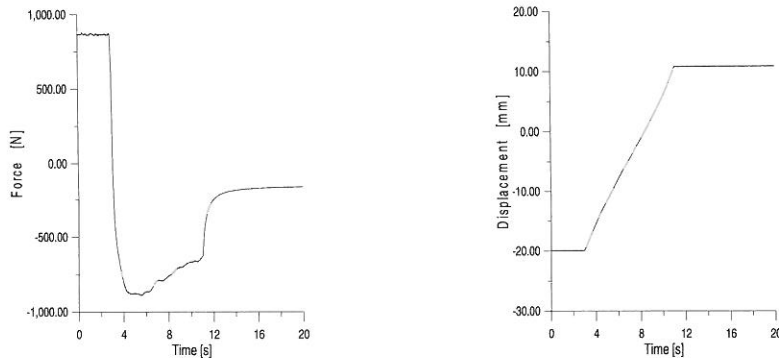
Figur 5 Flytning af bøtten hidrørende fra lastsekvenserne ; forsøgsserie S-270798. Kurven indikerer en initial flytning, eftersom det er den totale flytning der er afbildet, efter Leth og Mikkelsen, (1998).

3.2 Udtrækningsforsøg (pullout)

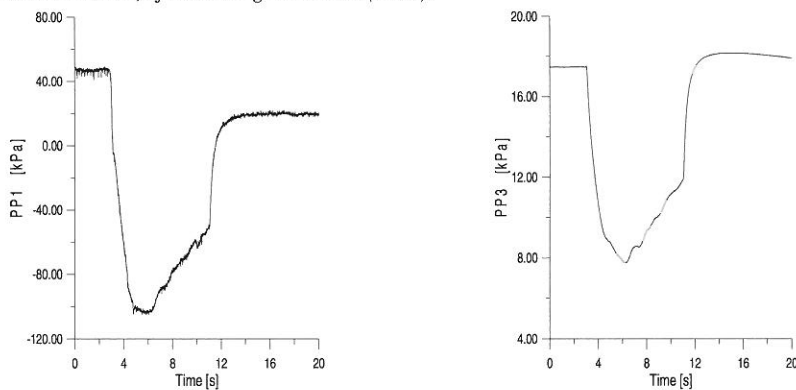
Ved et udtrækningsforsøg (også kaldet pullout), trækkes bøtten op af sandet med en konstant hastighed og sammenhørende værdier for kraft og poretryk måles. Alle de udførte pullout forsøg er gennemført efter et cyklisk forsøg, og derfor kan initialporetrykket i pullout testen være forskellig fra det hydrostatiske poretryk.

Et pullout forsøg udført ved en hastighed på 3.7 mm/s er gengivet i figur 6 og 7, hvor hhv. kraften, flytningen samt poretrykket på lokalitet PP1 (inde i bøtten) og PP3 (under skørtespids) er afbildet

som funktion af tiden. Figureerne viser, at der opstår et negativt poretryk inde i bøtten (sug), samt et fald i poretrykket under skørtespids, og at faldet i poretrykket er lidt tidsforskuet i forhold til den påførte kraft (negativ pga. træk). I dette forsøg blev der opnået en værdi tæt på vands bæreevne svarende til kavitation (fuldt vakuum på 100 kPa.).

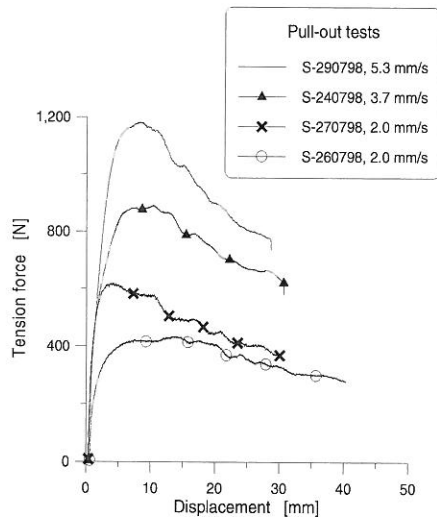


Figur 6 Optrækningskraft og flytning af bøtten fra et pullout forsøg, foretaget efter den cyklisk forsøgsserie S-240798, efter Leth og Mikkelsen (1998).



Figur7. Opbygning af poretryk ved lokalitet PP1 respektive PP3 for ovenstående forsøg, efter Leth og Mikkelsen (1998).

Trækkapaciteten blev undersøgt ved forskellige udtrækningshastigheder og efter forskellige belastningscykler og er afbildet i et kraft-deformations plot i figur 8. Trækkapaciteten er som forventelig stærkt afhængig af flytningsraten. Forsøg S270798 var et pullout forsøg efter et belastningsforsøg med 2 lastsekvenser (svarende til belastningerne fra figur 4) afbrudt af en pause, hvorimod S260798 bestod af en enkelt lastsekvens inden trækforsøget. Sammenligning af kurverne fra de to forsøg indikerer, at styrken af sandet øges, når sandet udsættes for gentagne lastsekvenser, svarende til at sandet har opnået en fastere lejring.



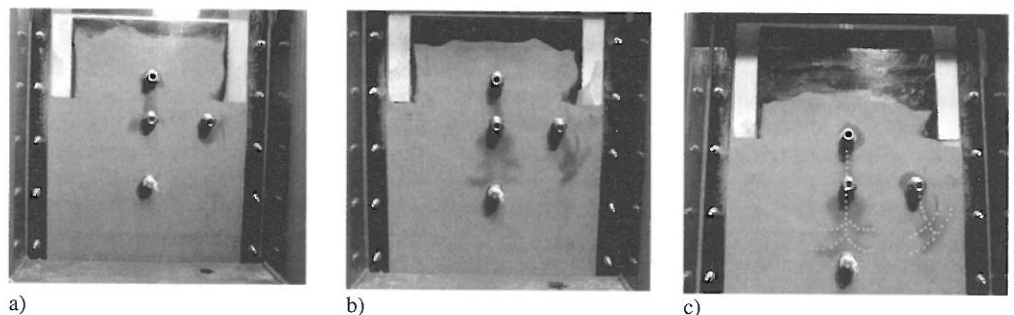
Figur 8. Udtrækningskraften afbildet som funktion af flytningen, for en række pullout forsøg, foretaget ved forskellig hastighed, efter Leth og Mikkelsen (1998).

3.3 Halv bøtte forsøg

Under cykliske forsøg med den halve bøtte blev der som nævnt i afsnit 2.3 injiceret rød frugtfarve gennem 3 huller i plexiglassiden, hvorpå udbredelsen blev observeret. Hvis der ikke var nogen strømning, ville den røde frugtfarve stige til tops, pga. en lavere densitet end vand, men som det fremgår af billedserien i figur 9, fremkommer en strømning svarende til en cirkulær strømning omkring skørtespidsen. Billedet er en smule forstyrret af friktionen hidrørende fra skinnerne, der holder den halve bøtte fast, men tendensen er entydig. Det fremkomne "strømnet" var reproducerbart.

Baseret på farveforskelle i sandoverfladen kunne udstrækningen af brudfiguren ved optrækning vurderes til ca. 1 bøttediameter. Dette var specielt tydeligt ved tømning af forsøgskassen for vand hvor poretafskille i den "uforstyrrede" jord og den forstyrrede jord omkring selve bøtten gav meget tydelige gråtoneforskelle i jorden.

Den samme udstrækning af bruddet kunne også observeres ved udtrækning af den fulde bøtte.



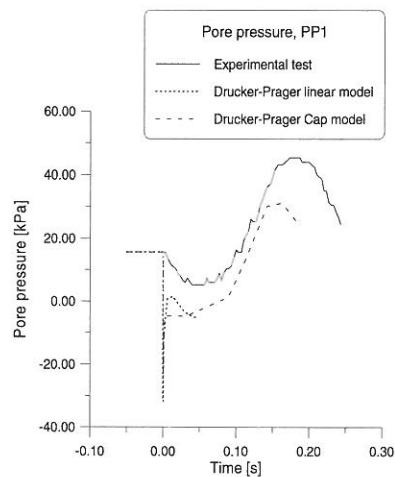
Figur 9 a) Efter 15 min cyklisk belastning b) Efter 35 min c) Brudlinier påtegnet efter endt forsøg efter Leth og Mikkelsen (1998).

4. FINITE ELEMENT BEREGNINGER

Efter udførelse af laboratorieforsøgene blev der udført numeriske beregninger ved hjælp af det ikke lineære finite element program ABAQUS, for at undersøge om det var muligt at simulere de observerede resultater numerisk.

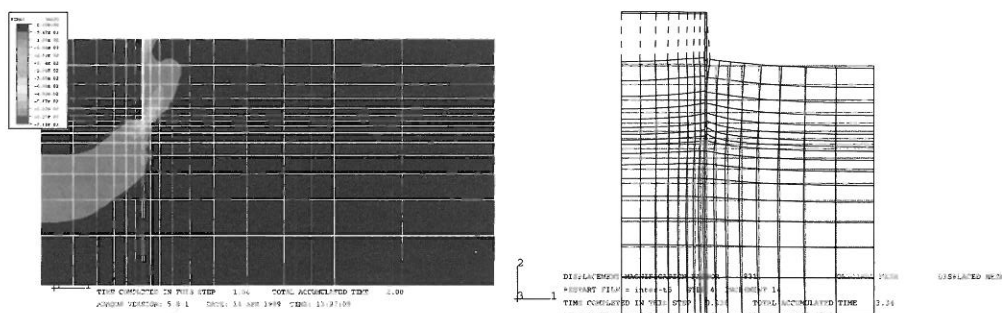
Indledningsvis blev der etableret en axisymmetrisk model, med anvendelse af 8 knudes elementer med poretryk og interface elementer mellem bøtten og jorden. Sandet blev modelleret ved hjælp af en Drucker Prager jordmodel i lineær hhv. capversion. Parametrene til beregningerne er angivet i Leth og Mikkelsen (1998).

Modellen havde visse begrænsninger, men var istand til at modellere opbygningen af det negative poretryk. I figur 10 er poretrykket inde i bøtten under låget (PP1) afbildet for hhv. et eksperimentelt forsøg, og FE-modellering med lineær respektivt capversion af Drucker-Prager jordmodellen..



Figur 10 Poretryk udvikling modelleret med hhv. den lineære og cap DP modellen, efter Leth og Mikkelsen (1998).

Efter at have implementeret andre interface elementer, blev forsøgene simuleret med anvendelse af Mohr-Coulomb jordmodellen. Den nye finite element model var istand til at simulere de observationer, der var foretaget under udtrækningsforsøgene (pullout). I figur 11 er de numeriske resultater for et pullout forsøg vist respektivt som a) brudfigur, i form af de plastiske tøjninger og b) den deformerede model.



Figur 11 Pullout forsøg a) De plastiske tøjninger "brudfiguren" b) Den deformerede model

5. KONKLUSION

Et nyt laboratorieudstyr til simulering af dynamisk påvirkede sugebøttefundamenter og undersøgelse af mekanismer i og omkring bøtten er designet og fremstillet på AAU. Udstyret er placeret i en eksisterende dynamisk opstilling, og giver mulighed for simulering af gentagne dynamiske påvirkninger svarende til vind-, bølge- samt ispåvirkninger.

I den nye forsøgsopstilling, hvor en bøtte simuleres under offshore betingelser, er det muligt at monitorere poretryk på udvalgte lokaliteter i sandet, bl.a. under skørtet og på steder hvor brudfiguren formodes at optræde, samtidig med at flytningen af og kraften på bøtten måles. Forsøg med en halv bøtte, placeret op mod en transparent væg, identificerer strømmingen i sandet under cyklisk belastning og ved optrækning af bøtten, sidstnævnte svarende til den maksimale trækstyrke i fundamentet. I forbindelse med optrækningen af bøtten har det også været muligt at visualisere udstrækningen af trækbrudfiguren omkring bøtten.

Der er udført en række forsøg med cyklisk belastning til simulering af forskellige last sekvenser på bøtten, og trækcapaciteten af en bøtte er undersøgt efter de forskellige belastningscykler og ved forskellige udtrækningshastigheder. Under alle forsøgene er den påførte kraft, udviklingen af poretrykket samt de resulterende flytninger målt.

Det nye laboratorieudstyr giver mulighed for at undersøge de fænomener og mekanismer, der opstår under sug, og for at simulere dynamisk påvirkede near- og offshore konstruktioner specielt med henblik på poretryks opbygningen i og omkring funderingskonstruktioner.

Der er foretaget FE simuleringer i ABAQUS af de udførte forsøg, hvor den numeriske model er istand til at genskabe de eksperimentelle data fra udtrækningsforsøgene (pullout), mens det kun var muligt at genskabe enkelte tendenser fra forsøgene med cykliske belastninger.

6. REFERENCER

- Feld, T., Sørensen, P.H. & Rasmussen, J.L., 1999. Structural and economic optimization of offshore wind turbine support structure and foundation.. *Proceedings of the 18th International OMAE conference New foundland, July 1999. To be published in the OMAE Journal*
- Ibsen, L.B. & Bødker, L., 1994. *Data report 9301, Baskarp sand No. 15*, Laboratoriet for fundering. Aalborg: Aalborg Universitet.
- Leth, C.T. & Mikkelsen, H., 1998. *Behavior of bucket foundation in sand*. M.Sc. Thesis. Aalborg: Aalborg University
- Rasmussen, M.S., 1996. *Behavior of structures subjected to cyclic loadings*. Ph. D. Thesis. Soil Mechanics Laboratory, Aalborg University